

수평으로 경사진 박스암거 위 콘크리트 포장 슬래브의 최적 줄눈위치

Optimal Joint Position in Concrete Pavement Slab over Skewed Box Culvert

염우성 Yeom, Woo Seong
정호성 Jeong, Ho Seong
연우 Yan, Yu
손덕수 Sohn, Dueck Soo
이재훈 Lee, Jae Hoon
정진훈 Jeong, Jin Hoon

정회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail: reikoku@nate.com)
정회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail: hosung0824@naver.com)
정회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail: yanyu0110@nate.com)
정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 (E-mail: mgsds@ex.co.kr)
정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 (E-mail: ranian74@ex.co.kr)
정회원 · 인하대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail: jhj@inha.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The purpose of this study is to investigate the optimal joint positions which can minimize distresses of concrete pavement containing box culvert with horizontally skewed angles.

METHODS : The concrete pavement containing the box culvert with different skewed angles and soil cover depths was modeled by 3 dimensional finite element method. The contact boundary condition was used between concrete and soil structures in addition to the nonlinear material property of soil in the finite element model. A dynamic analysis was performed by applying the self weight of pavement, negative temperature gradient of slab, and moving vehicle load simultaneously.

RESULTS : In case of zero skewed angle (0°), the maximum tensile stress of slab was the lowest when the joint was positioned directly over side of box culvert. In case there was a skewed angle, the maximum tensile stress of slab was the lowest when the joint passed the intersection between side of the box culvert and longitudinal centerline of slab. The magnitude of the maximum tensile stress converged to a constant value regardless the joint position from 3m of soil cover depth at all of the horizontally skewed angles.

CONCLUSIONS : More reasonable and accurate design of the concrete pavement containing the box culvert can be possible based on the research results.

Keywords

concrete pavement, concrete slab, box culvert, skew, soil cover depth, finite element analysis

Corresponding Author : Jeong, Jin Hoon, Associate Professor
Dept. of Civil Engineering, Inha University,
100 Inha-ro, Nam-gu, Incheon, 402-751, Korea
Tel : +82.32.860.7574 Fax : +82.32.873.7560
E-mail : jhj@inha.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ijhe.or.kr/
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)

1. 서론

도로포장의 하부층인 노상과 보조기층은 건설 당시의 엄격한 다짐관리에도 불구하고 시간이 지나면 침하가 발생되어 포장의 공용성에 영향을 미친다. 특히 포장하

부에 박스암거 등의 지중구조물이 매설되면 지반과 지중구조물의 경계에서 강성이 급격히 변화하고 이로 인하여 구조적으로 취약해진다. 여기에 하중이 재하되었을 때, 지중구조물 주변의 콘크리트 슬래브에는 균열,

단차, 줄눈 벌어짐, 부등침하 등과 같이 공용성을 저하는 다양한 문제가 발생한다(Han et al., 2000).

콘크리트 포장 슬래브의 줄눈은 하중에 의해 슬래브에 발생하는 인장응력을 낮추어 비정형의 횡방향 균열 발생을 억제하는 역할을 한다. 따라서 구조적으로 취약한 위치인 지중구조물 측면 근처에 줄눈을 설치한다면 슬래브 내부의 응력을 낮추고 균열을 억제하여 포장 공용성 증가에 도움을 줄 것으로 예상된다. Park 등(2012)은 줄눈위치별로 콘크리트 포장 슬래브에 발생하는 최대인장응력의 위치 및 크기를 2차원 유한요소방법으로 분석하고, 줄눈을 박스암거 측면 근처에 설치하는 방법으로 포장의 공용성을 증가시킬 수 있다고 보고하였다. 도로의 건설로 인해 통행이 막히게 된 기존 농로나 국지도로를 신설도로 밑으로 통과시키는 역할을 하는 박스암거는 신설도로를 정확히 직각으로 통과하는 경우가 드물어 대부분 직각을 기준으로 하는 소정의 수평경사각을 갖게 된다. 도로암거표준도(MLTM, 2008)에 따르면 신설도로 하부를 통과하는 박스암거의 수평경사각은 0°, 15°, 30°, 45°를 표준으로 하며, 도로와 박스암거가 수직인 상태가 0°이다.

본 논문에서는 고속도로 건설공사 표준도(KEC, 2012)를 참고하여 박스암거를 갖는 콘크리트 포장의 3차원 유한요소모형을 제작하였다. 포장하부에 매설된 박스암거의 수평경사각에 따라 슬래브 줄눈의 위치와 박스암거 매설깊이를 변화시키면서 포장체의 자중, 환경하중, 그리고 차량하중에 의한 콘크리트 포장의 거동을 해석하고, 적정 줄눈위치를 예측하였다.

2. 유한요소모형

박스암거가 매설된 콘크리트 포장을 3차원 유한요소방법으로 모형화하여 수치해석을 수행하였다. 범용 유한요소해석 프로그램의 C3D8 3D Stress 요소방법을 사용하여 8개의 절점을 갖는 직육면체 요소(8-noded brick element)로 모형을 구성하였다. 단, 요소별 해석 결과에 오차가 발생하여 정확한 이론값에 수렴하지 않는 전단잠김(Shear locking)현상을 방지하기 위하여 콘크리트 슬래브와 린 콘크리트 보조기층, 그리고 보강슬래브에서는 저감적분(Reduced integration) 방법을 사용하였다. 저감적분 방법은 각 요소의 이론적 함수를 수치적으로 정확하게 적분하기 위하여 수치적분 값을 갖는 샘플링 지점(Sampling point)의 수를 필요한 지점의 수보다 줄여서 수치적분하여 전단잠김 현상이 발생되지 않도록 하는 방

법이다. 다웰바는 빔요소(Embedded beam element)를 사용하여 컨빅터로 슬래브의 절점과 연결하였으며, 차량 하중을 지지할 수 있는 연직방향의 강성만을 갖도록 하였다. Fig. 1과 같이 아래로부터 노상, 뒷채움부, 박스암거, 보강슬래브, 린 콘크리트 보조기층, 그리고 콘크리트 슬래브로 구분하여 포장체를 모형화하였다. 도로암거 표준도(MLTM, 2008)의 일반 중형 박스암거 크기인 4.5m×4.5m(두께 0.5m)를 사용하고, 보강슬래브가 얹히는 브라켓의 내민 길이는 300mm로 구성하였다. 또한 고속도로 건설공사 표준도(KEC, 2012)를 참고하여 콘크리트 슬래브 간은 D32×L500의 다웰바로, 박스암거와 보강슬래브 사이는 D25×L500의 다웰바로 각각 연결하였다. 박스암거로부터 암거 내부 쪽의 14배 이상 멀어지면 지반과 박스암거 간의 상호작용이나 흙의 유효밀도에 변화가 없다는 Kim(2000)의 연구결과를 참고하여, 전체 모형의 길이는 66m로 정하였다. 또한 모형의 폭은 중차량이 가장 많이 통행하는 최외곽 차로 슬래브의 대표적 폭인 4.2m로 정하였다. 모형의 제원과 요소의 유형은 Table 1과 같다.

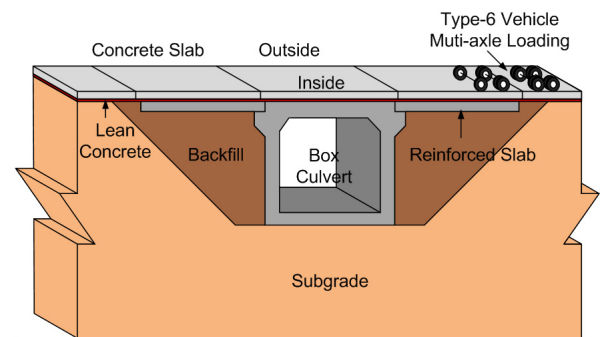


Fig. 1 Finite Element Model of Pavement

Table 1. Size and Element Type of Model Component

Model Component	Size*	Element type
Concrete slab	L6.0×W4.2×T0.3 Length of slab over box culvert is variable	C3D8R
Lean concrete subbase	L66.0×W4.2×T0.15	C3D8R
Box culvert	L4.5×W4.2×H4.5×T0.5	C3D8R
Reinforced Slab	L6.0×W4.2×T0.4	C3D8R
Subgrade	L66.0×W4.2×T11.5	C3D8
Dowel bar	D32×L500 D25×L500	B31

*L : Length(m), Dowel=mm); W : Width(m); T : Thickness(m); H : Height(m); D : Diameter(mm)

Table 2. Material Property of Model Component

	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's ratio	Density (t/m ³)	Friction angle (degree)	Dilation angle (degree)	Cohesion yield stress (MPa)	Thermal expansion coefficient(/°C)
Concrete slab	28,000	0.18	2.5	-	-	-	10×10 ⁻⁶
Lean concrete subbase	15,000	0.20	2.3	-	-	-	-
Dowel bar	200,000	0.30	-	-	-	-	-
Box culvert	31,000	0.15	2.5	-	-	-	-
Backfill materials (Bowles, 1996)	110	0.25	2.0	40	0.1	0	-
Subgrade (Pimentel et al., 2009)	70	0.30	1.9	35	0.1	0.01	-

콘크리트 슬래브와 린 콘크리트 보조기층 간의 접촉면은 분리막으로 인해 미끄러짐이 허용되므로 Contact 방법으로 모형화하였고, 노상과 박스암거 및 노상과 린 콘크리트 보조기층 간의 접촉면도 마찰계수를 달리하여 동일한 방법으로 모형화하였다. 문헌을 참고하여 노상과 박스암거 간은 0.40, 노상과 린 콘크리트 보조기층 사이는 0.45, 린 콘크리트 보조기층과 콘크리트 슬래브 사이는 0.20의 마찰계수를 적용하였다(KGS, 2009; NAVFAC, 1982). 현재 일반적으로 사용되고 있거나 Bowles(1996), Jung(2004), 그리고 Pimentel 등(2009)이 제시한 Table 2의 물성을 모형에 적용하였고, 노상과 뒷채움 재료는 압밀이 완료되었다고 가정하여 Mohr Coulomb Plasticity 특성으로 흙의 탄소성 거동을 모사하였다. 신속하고 편리한 해석을 위해서 콘크리트 재료의 시간 의존적 특성은 배제하였다.

본 연구에서는 3가지 하중조건을 고려하였다. 먼저 포장 전체의 자중을 연직하향으로 고려하고, 온도하중을 적용한 후 차량하중을 재하하였다. Park 등(2011)의 연구결과에 따라 차량하중 재하 시 슬래브에 더 큰 인장응력을 발생시키는 음의 온도구배를 온도하중으로 사용하기로 하고, 인구가 밀집하고 교통량이 많은 서울 지역 300mm 두께의 콘크리트 슬래브에 발생하는 음의 최대 온도구배 -0.63°C/cm를 한국형 포장설계법의 온도예측 프로그램(MLTM, 2011)으로 구하여 해석에 적용하였다. 차량하중의 경우, 단륜단축이 슬래브에 가장 큰 응력을 발생시키므로 12종의 차중 가운데 단륜단축 하중이 가장 큰 Fig. 2의 6종 차량을 해석에 사용하였다(Park et al., 2011). 한국형 포장설계법 프로그램(MLTM, 2011)을 참고하여 6종 차량 축하중의 누적빈도 95%에 해당하는 단륜단축 90kN, 복륜단축 90kN, 그리고 복륜복축 195kN을 적용하였고, 차륜의 접지폭과 길이는 Jo 등(2006)을 참고하여 220mm와 334mm

로 결정하였다.

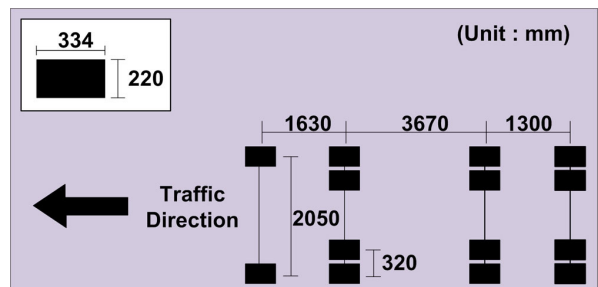


Fig. 2 Dimension of Typical Type 6 Vehicle

포장체의 자중과 음의 온도구배가 고려된 상태에서 60km/h 속도의 차량을 최외곽 차로 슬래브의 내측 단부와 외측 단부로 각각 주행시키고, 이때 슬래브에 발생된 최대인장응력의 크기와 위치를 조사하였다. 여기서, 슬래브 내측과 외측의 구분은 도로의 내측과 외측을 기준으로 하였다. 본 연구에서는 직접적분방법 중, 한 단계 다음 시점($t+\Delta t$)에서의 평형방정식으로부터 해를 구하는 Implicit 방법을 적용하여 시간이력해석을 수행하였다. 또한, 이동하는 차량하중과 슬래브 간의 동적 상호작용의 영향을 고려하기 위해 Rayleigh damping을 적용하였고, ABAQUS(2008)를 참고하여 질량감쇄계수와 강성감쇄계수를 각각 0.3275와 0.0076으로 설정하였다.

3. 수평경사각에 따른 줄눈위치별 슬래브 거동

박스암거 위 포장 슬래브에 발생하는 인장응력을 최소화하는 줄눈위치를 제시하기 위하여 박스암거의 수평경사각과 줄눈위치를 바꾸어 가며 유한요소해석을 실시하였다. 박스암거의 수평경사각은 박스암거가 도로를 수직(0°C)으로 통과하는 경우를 기준으로 하고 도로암거 표준도(MLTM, 2008)를 참고하여 0°, 15°, 30°, 45°의 경우를 각각 모형화하였다. 그리고 포장체의 자중과 온도하중이

가해진 상태에서 줄눈위치를 변화시키며 차량하중에 의한 동적해석을 실시하여 슬래브의 거동을 분석하였다.

3.1. 수평경사각이 0° 인 경우

수평경사각이 0°인 경우, 즉 박스암거가 도로를 직각으로 통과할 때 포장 슬래브에 발생하는 응력을 최소화하는 줄눈위치를 결정하기 위해 Fig. 3과 같이 줄눈의 위치를 변화시키며 유한요소해석을 실시하였다. 박스암거 중앙 바로 위에 길이 6m 슬래브의 중앙을 위치시킨(박스암거 측면 바로 위에 슬래브의 줄눈이 위치한) A1부터 박스암거 중앙 바로 위에 줄눈이 위치한 A5까지, 포장 슬래브의 위치를 우측으로 0.75m씩 이동시키면서 5개의 유한요소모형을 제작하였다. 앞서 설명했듯이, 박스암거는 내부의 크기가 4.5m×4.5m(두께 0.5m)로서 외부 폭은 5.5m이며, 브라켓의 내민길이 300mm까지 합하면 전체 폭이 6.1m로 포장 슬래브의 길이 6m와 거의 동일하다.

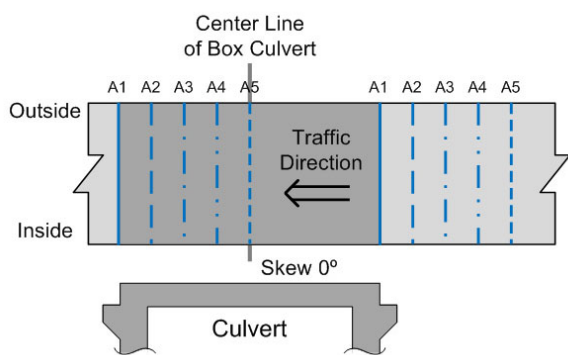


Fig. 3 Joint Positions in Slab over 0° Skewed Box Culvert

먼저 포장체의 자중을 고려하고, 음의 온도구배 -0.63℃/cm를 슬래브에 온도하중으로 재하하여 상향컬링을 모사한 후 60km/h의 속도로 차량을 진행시키면서 포장의 거동을 해석하였다. 박스암거의 수평경사각이 0°일 때는 슬래브 내측과 외측의 포장이 슬래브의 종방향 중심선을 기준으로 대칭이므로, 차량은 Fig. 4와 같이 운전자 측 차륜이 슬래브 내측 단부를 따라 1개 측면과 1개 방향으로만 진행시켰다. 앞서 언급한 것과 같이 슬래브의 내측과 외측은 도로의 내측과 외측을 기준으로 구분한 것이다. 줄눈위치별로 슬래브에 발생한 최대인장응력의 위치는 Fig. 4에 원으로 표시하였다. 줄눈이 박스암거 중앙에 가까울수록, 즉 A5로 갈수록 슬래브의 최대인장응력이 커지는 경향을 보였다. 최대인장응력은 슬래브 단부의 양쪽 줄눈 근처에 차축이 위치하였을 때 슬래브 단부 중앙의 상단에서 발생하였다.

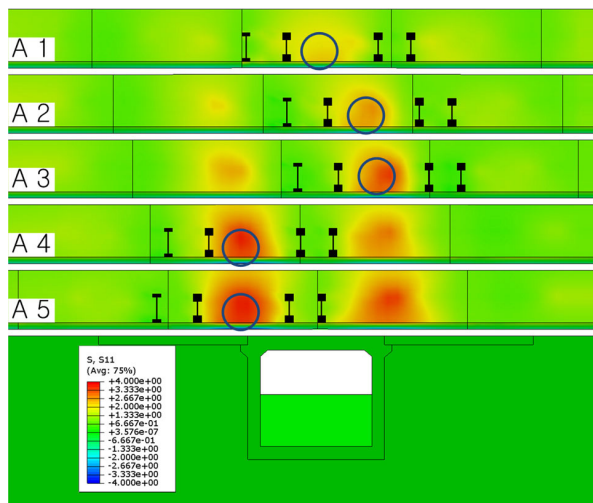


Fig. 4 Magnitude and Position of Maximum Tensile Stress Based on Positions of Joint and Vehicle (0° Skewed Box Culvert)

Fig. 5에서 보듯이 박스암거 측면 바로 위에 슬래브의 줄눈이 위치한 A1에서 최대인장응력이 가장 작았으며, 줄눈이 박스암거 중앙 위에 위치한 A5로 갈수록 점차 증가하였다. 줄눈위치가 박스암거 중앙으로 이동함에 따라 슬래브의 일부는 강성이 큰 박스암거 위에 나머지는 상대적으로 강성이 작은 지반 위에 얹히는 구조가 되므로, 박스암거와 지반 간의 강성 또는 지지력의 차이가 슬래브에 발생한 인장응력의 크기와 위치에 영향을 준 것으로 판단되었다. 따라서 박스암거가 도로에 정확히 직각으로 위치한 경우, 슬래브의 줄눈을 박스암거 측면 가까이 설치하는 방법으로 콘크리트 포장의 파손을 최소화할 수 있다고 판단되었다.

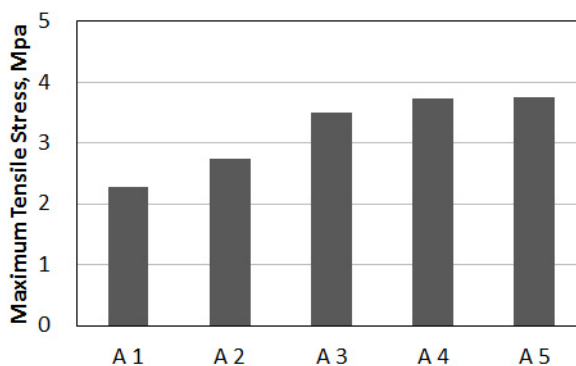


Fig. 5 Maximum Tensile Stress of Slab over 0° Skewed Box Culvert Based on Joint Position

3.2. 수평경사각이 15° 인 경우

박스암거가 도로를 수평으로 15° 경사져서 통과하는 경우에 대하여 앞 절과 동일한 방법으로 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 6과 같이 박스암거의 측면과 슬래

브의 외측 단부(B1), 종방향 중심선(B2), 그리고 내측 단부(B3)가 교차하는 곳에 횡방향 줄눈이 통과하는 3개의 유한요소모형을 제작하였다. 최대인장응력의 크기 및 위치와 그 때의 차량하중의 위치를 찾기 위하여 6종 차량을 슬래브의 내측 및 외측 단부로 통과시키면서 동적해석을 수행하였다.

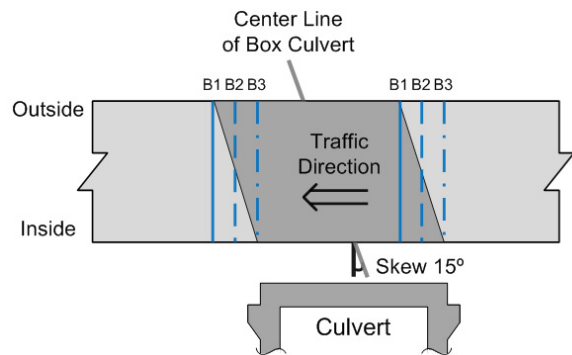


Fig. 6 Joint Positions in Slab over 15° Skewed Box Culvert

Fig. 7에서 보듯이 최대인장응력은 차량하중이 재하된 쪽 슬래브 단부의 상단에서 발생하였다. 슬래브 외측 및 내측 단부가 박스암거 측면과 만나는 지점을 줄눈이 통과하는 B1 및 B3의 경우에는, 그 맞은편 단부에 차량하중이 재하될 때 단부와 줄눈이 교차하는 위치에서 최대인장응력이 발생하였다. 슬래브의 종방향 중심선과 박스암거 측면이 교차하는 곳을 줄눈이 통과하는 B2의 경우에는 박스암거를 지나 바로 만나는 슬래브의 내측 단부에 차량하중이 재하되었을 때 박스암거 바로 위 슬래브 단부 중앙의 상단에서 최대인장응력이 발생하였고, B1 및 B3의 경우와 달리 비교적 작은 응력이 넓게 분포되었다.

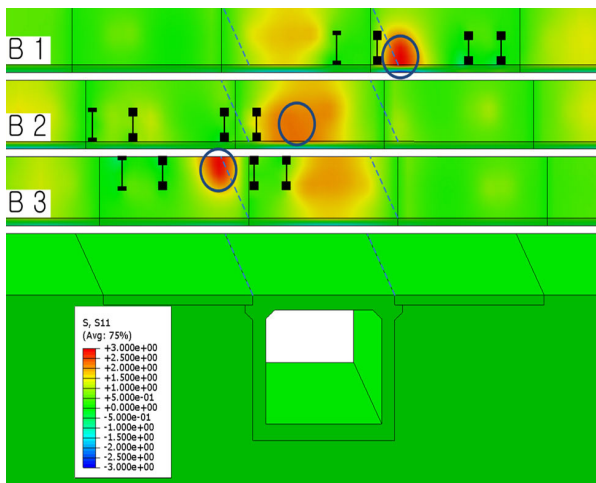


Fig. 7 Magnitude and Position of Maximum Tensile Stress Based on Positions of Joint and Vehicle (15° Skewed Box Culvert)

Fig. 8에서 보듯이 박스암거 측면과 슬래브 외측 및 내측 단부가 만나는 지점을 줄눈이 통과하는 B1과 B3의 경우 최대인장응력의 크기가 유사하게 나타났다. 슬래브의 종방향 중심선과 박스암거 측면의 교차점을 줄눈이 통과하는 B2의 경우는 최대인장응력이 B1 및 B3의 약 3/4 수준으로 작게 발생했다. 따라서 박스암거가 수평으로 15° 경사져서 도로를 통과하는 경우에는 슬래브의 종방향 중심선과 박스암거의 측면이 만나는 지점을 줄눈이 통과하도록 설치하는 것이 합리적으로 나타났다.

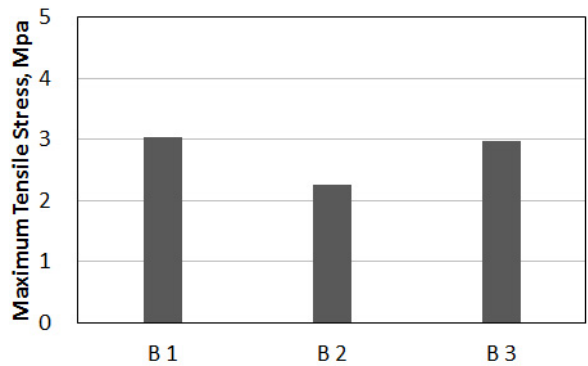


Fig. 8 Maximum Tensile Stress of Slab over 15° Skewed Box Culvert Based on Joint Position

3.3. 수평경사각이 30° 인 경우

박스암거와 도로가 수평으로 30° 경사진 경우에 대해서도 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 9와 같이 박스암거 측면과 슬래브의 외측 단부(C1), 종방향 중심선(C2), 그리고 내측 단부(C3)가 만나는 곳에 각각 줄눈을 위치시키고 앞 절의 15° 경사진 경우와 동일한 방법으로 해석하였다.

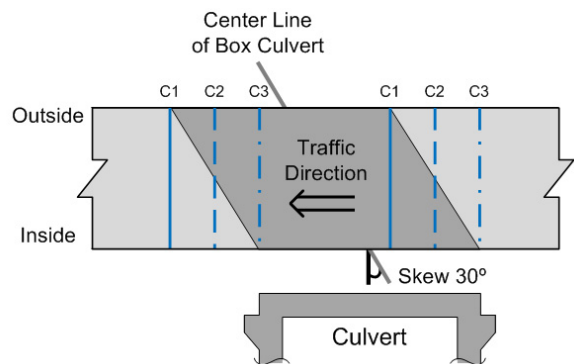


Fig. 9 Joint Positions in Slab over 30° Skewed Box Culvert

각 줄눈위치별로 슬래브에 발생한 최대인장응력의 크기 및 위치와 그 때의 차량하중의 위치는 Fig. 10과 같다. 슬래브 외측 및 내측 단부가 박스암거 측면과 만나

는 곳을 줄눈이 통과하는 C1 및 C3의 경우, 그 맞은편 단부에 차량하중이 재하될 때 단부와 줄눈이 교차하는 위치에서 최대인장응력이 발생하였다. 슬래브의 종방향 중심선과 박스암거 측면이 교차하는 지점을 줄눈이 통과하는 C2의 경우에는 박스암거에 도달하기 직전의 슬래브 내측 단부에 차량하중이 재하되었을 때 그 곳의 박스암거 측면과 슬래브 내측 단부가 만나는 지점에서 슬래브 상단에 최대인장응력이 발생하였고, C1과 C3의 경우보다는 응력의 크기가 작았다.

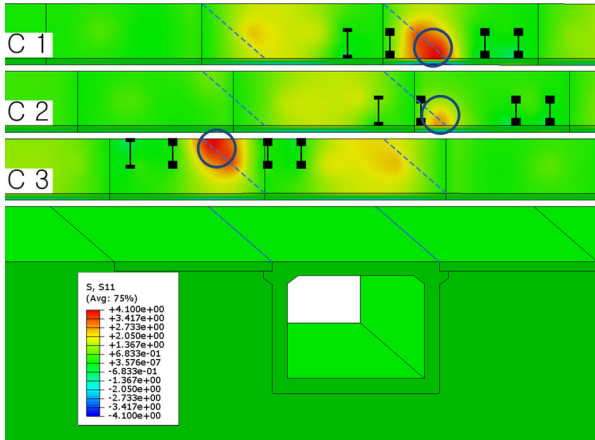


Fig. 10 Magnitude and Position of Maximum Tensile Stress Based on Positions of Joint and Vehicle (30° Skewed Box Culvert)

각 줄눈위치별로 슬래브에 발생한 최대인장응력의 크기를 Fig. 11에서 비교하였다. 슬래브 외측 단부 및 내측 단부가 박스암거 측면과 만나는 지점을 줄눈이 통과하는 C1 및 C3는 수평경사각 15°의 경우와 유사한 크기의 최대인장응력을 보였다. 박스암거 측면과 슬래브 종방향 중심선이 만나는 곳에 줄눈을 위치시킨 C2의 최대인장응력은 C1과 C3의 2/3에서 3/4 사이의 수준으로 가장 작았다. 따라서 박스암거와 도로 간의 수평경사각이 30°인 경우도 박스암거 측면과 슬래브 종방향 중심

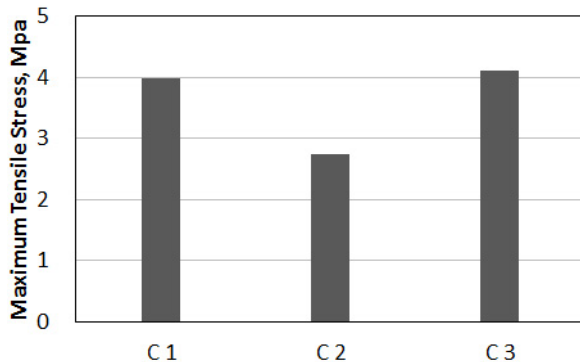


Fig. 11 Maximum Tensile Stress of Slab over 30° Skewed Box Culvert Based on Joint Position

선이 만나는 곳에 줄눈을 통과시키는 것이 가장 합리적이라고 판단되었다.

3.4. 수평경사각이 45°인 경우

박스암거와 도로가 수평으로 45° 경사진 경우에 대해서도 유한요소해석을 실시하였다. 다른 수평경사각의 경우와 달리 박스암거 측면과 슬래브의 외측 단부(D1), 종방향 중심선(D3), 내측 단부(D5)가 만나는 3곳 외에도 중간 2곳(D2, D4)에 줄눈을 추가로 위치시켜 총 5개의 경우에 대하여 앞 절의 15° 및 30° 경사진 경우와 동일한 방법으로 해석을 수행하였다.

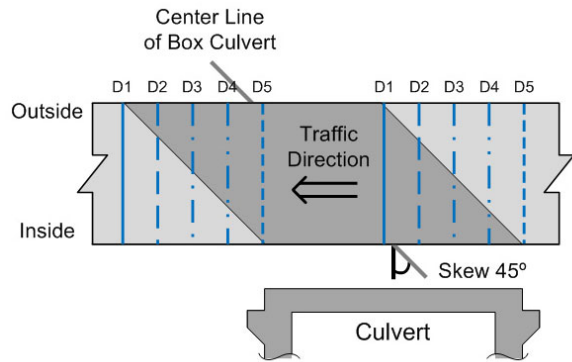


Fig. 12 Joint Positions of Slab over 45° Skewed Box Culvert

각 줄눈위치별로 슬래브에 발생한 최대인장응력의 크기 및 위치와 그 때의 차량하중의 위치는 Fig. 13과 같다. 5개의 경우 모두 슬래브 단부와 박스암거 측면이 교차하는 곳 근처에 차량하중이 가해졌을 때 그 위치의 슬

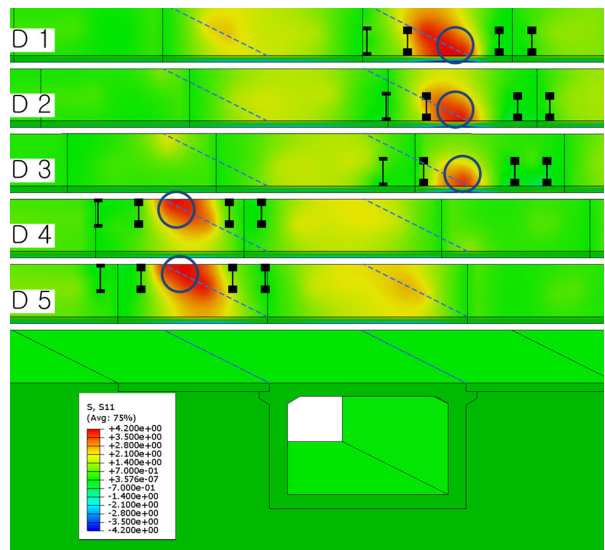


Fig. 13 Magnitude and Position of Maximum Tensile Stress Based on Positions of Joint and Vehicle (45° Skewed Box Culvert)

래브 상단에서 최대인장응력이 발생하였고, 박스암거 측면과 슬래브 종방향 중심선이 만나는 곳을 줄눈이 통과하는 D3의 경우에서 응력이 가장 작았다.

각 줄눈위치별로 슬래브에 발생한 최대인장응력의 크기를 Fig. 14와 같이 비교하였다. 슬래브 외측 단부 및 내측 단부가 박스암거 측면과 만나는 곳에 줄눈이 위치한 D1과 D5를 비롯하여 D2와 D4는 거의 비슷한 수준의 최대인장응력을 나타냈다. 박스암거 측면과 슬래브 종방향 중심선이 만나는 곳을 줄눈이 통과하는 D3의 최대인장응력은 다른 경우의 약 3/4 수준으로 가장 작게 나타났다. 따라서 박스암거와 도로 간의 수평경사각이 45°인 경우에도 박스암거 측면과 슬래브 종방향 중심선이 만나는 곳으로 줄눈을 통과시켜서 슬래브의 응력을 최소화할 수 있는 것으로 판단되었다.

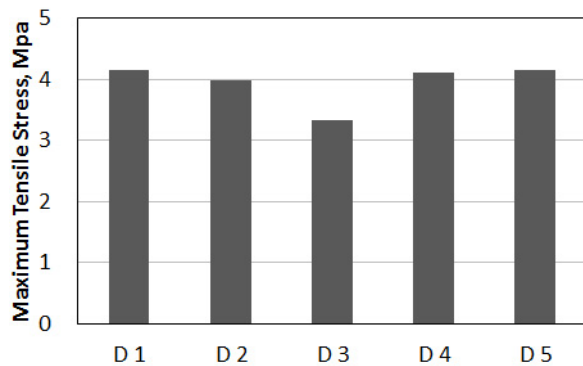


Fig. 14 Maximum Tensile Stress of Slab over 45° Skewed Box Culvert Based on Joint Position

3.5. 수평경사각에 따른 최대인장응력의 비교

박스암거 측면과 슬래브 종방향 중심선이 만나는 곳에 줄눈이 위치하여 최대인장응력이 작았던 B2, C2, 그리고 D3의 경우, 수평경사각이 클수록 최대인장응력이 Fig. 15와 같이 증가하는 경향을 보였다. 박스암거 측면

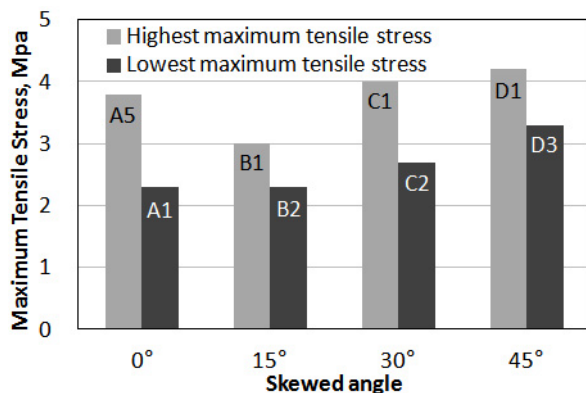


Fig. 15 Highest and Lowest Maximum Tensile Stress according to Skewed Angle and Joint Position

바로 위에 슬래브의 줄눈이 위치하여 최대인장응력이 가장 작았던 수평경사각 0°의 A1은 Fig. 15와 같이 수평경사각 15°의 B2와 유사한 크기의 최대인장응력을 보였다. 박스암거 측면과 슬래브 외측 또는 내측 단부가 만나는 곳에 줄눈이 위치하여 최대인장응력이 컸던 B1, C1, 그리고 D1의 경우도 수평경사각이 클수록 최대인장응력이 증가하였다. 박스암거 중앙 바로 위에 줄눈이 위치하여 최대인장응력이 가장 컸던 수평경사각 0°의 A5는 수평경사각 15°의 B1보다는 크고 30°의 C1보다는 작은 크기의 최대인장응력을 보였다.

4. 박스암거 매설깊이에 따른 슬래브 거동

박스암거의 매설깊이가 콘크리트 포장 슬래브의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 매설깊이를 0m, 1m, 2m, 3m, 그리고 4m로 변화시키면서 유한요소해석을 수행하였다. 본 연구에서는 린 콘크리트 보조기층 하단부터 박스암거 상단까지의 거리를 매설깊이(Soil cover depth)라고 정의하였다. 최소 및 최대 수평경사각인 0°와 45°에 대하여 해석을 수행하였으며, 수평경사각 0°의 경우는 박스암거 측면 바로 위에 슬래브의 줄눈이 위치한 A1, 박스암거 폭의 1/4 위치에 줄눈이 설치된 A3, 박스암거 중앙 바로 위에 줄눈이 위치한 A5의 3가지에 대하여 박스암거 매설깊이에 따른 슬래브 거동을 해석하였다. 수평경사각 45°의 경우는 박스암거 측면과 슬래브 단부가 만나는 지점을 줄눈이 통과하는 D1, 박스암거 측면과 슬래브 종방향 중심선이 만나는 지점을 줄눈이 통과하는 D3, 그리고 D1과 D3의 사이인 D2의 3가지에 대하여 해석하였다. 매설깊이를 제외한 다른 조건들은 앞 절의 경우와 동일하게 적용하였다.

먼저 수평경사각 0°에 대하여 해석한 결과, Fig. 16과 같이 A1이 다른 줄눈위치의 경우에 비하여 모든 매설깊이에서 최대인장응력이 가장 작게 나타났다. A3과 A5의 경우는 매설깊이가 증가함에 따라 박스암거의 영향이 작아져서 슬래브에 발생한 최대인장응력이 감소하였다. 하지만 A1의 경우는 매설깊이가 얇을 때 응력이 가장 작았는데, 이는 슬래브의 구조적 취약 위치인 박스암거와 보강슬래브 연결부 바로 위에 줄눈이 위치하여 매설깊이가 얇을 때 박스암거와 보강슬래브가 구조적으로 슬래브의 두께를 증가시키는 역할을 했기 때문으로 판단되었다. 박스암거의 매설깊이가 3m 이상이 되면서 부터는 줄눈위치에 상관없이 슬래브에 발생한 최대인장응력의 크기가 일정한 값에 수렴하는 것으로 나타났다.

따라서 박스암거의 매설깊이가 3m 이상으로 깊어질 경우에는 줄눈의 위치가 슬래브의 응력에 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다.

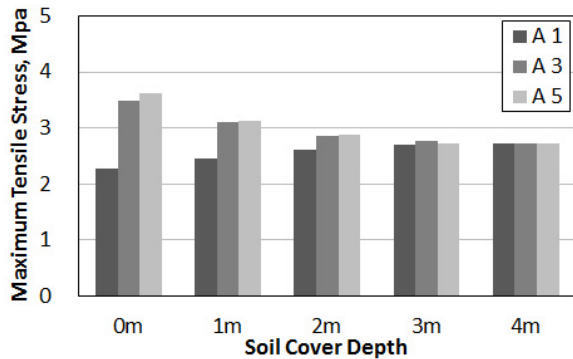


Fig. 16 Maximum Tensile Stress of Slab over 0° Skewed Box Culvert Based on Soil Cover Depth

수평경사각 45°의 경우 Fig. 17과 같이 D3가 다른 줄눈위치의 경우에 비하여 모든 매설깊이에서 최대인장응력이 가장 작게 계산되었다. 매설깊이가 증가할수록 슬래브에 발생한 최대인장응력이 감소하였고 D1, D2, D3 간 응력의 차이도 작아졌다. 매설깊이가 3m 이상이 되면서부터는 수평경사각 0°의 경우와 마찬가지로 줄눈위치에 상관없이 슬래브 최대인장응력의 크기가 일정한 값에 수렴하였다. 따라서 수평경사각이 큰 경우에도 매설깊이가 3m 이상일 경우에는 수평경사각 0°의 경우와 마찬가지로 줄눈의 위치가 슬래브의 응력에 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다.

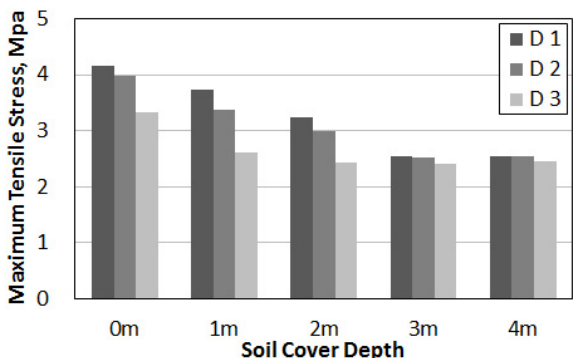


Fig. 17 Maximum Tensile Stress of Slab over 45° Skewed Box Culvert Based on Soil Cover Depth

5. 결론

박스암거가 경사져서 통과하는 도로 포장의 콘크리트 슬래브 파손을 최소화할 수 있는 적정 줄눈위치를 조사하기 위해서 박스암거의 수평경사각과 매설깊이를 변화

시키며 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 박스암거가 존재하는 콘크리트 포장을 모형화하고 자중, 음의 온도 하중, 그리고 차량하중을 동시에 재하하여 슬래브의 동적 응답특성을 분석하였다. 박스암거의 수평경사각이 0°의 경우, 박스암거 측면 바로 위에 줄눈이 위치하였을 때 (A1) 슬래브의 최대인장응력이 가장 작게 발생하였다. 수평경사각 15°, 30° 그리고 45°에서는 박스암거 측면이 슬래브의 종방향 중심선과 만나는 지점을 줄눈이 통과할 때 (B2, C2, D3) 최대인장응력이 가장 작았다. 최대인장응력의 크기는 박스암거의 수평경사각이 클수록 증가하는 경향을 보였다. 박스암거의 매설깊이를 변화시키며 수평경사각과 줄눈위치에 따라 유한요소해석을 수행한 결과, 수평경사각 0°에서는 매설깊이에 상관없이 박스암거 측면 바로 위에 줄눈이 위치할 때 최대인장응력이 가장 작게 발생하였다. 수평경사각 45°에서는 매설깊이에 상관없이 박스암거 측면과 슬래브의 종방향 중심선이 만나는 지점을 줄눈이 통과할 때 최대인장응력이 가장 작았다. 모든 수평경사각에서 박스암거의 매설깊이가 3m 이상이 되면서부터는 줄눈의 위치에 상관없이 최대인장응력의 크기가 일정한 값에 수렴하는 것으로 나타났다. 따라서, 박스암거가 매설된 콘크리트 포장의 파손을 최소화하기 위해서는 매설깊이 3m 미만에 한하여 수평경사각 0°의 경우는 박스암거의 측면 바로 위에, 그리고 수평경사각이 있는 경우는 박스암거 측면과 슬래브 종방향 중심선이 만나는 곳을 줄눈이 통과하는 것이 가장 바람직하다고 판단되었다. 이상의 결과를 바탕으로 박스암거가 통과하는 콘크리트 포장에 대한 보다 합리적이고 정확한 설계가 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사의 지중구조물 상부 콘크리트 포장 보강설계 및 유지관리 기술개발 3차년도 연구비 지원에 의해 수행되어 이에 감사드립니다.

References

- ABAQUS(2008). *Theory Manual Version 6.8*, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.
- Bowles, J. E.(1996). *Foundation Analysis and Design*, 5th Edition, Mc Graw-Hill Companies, Inc., NY, pp. 589-623, pp. 781-782.
- Han S. H., Kwon S. M., and Um I. S.(2000). *Enhanced Performance of Reinforced Concrete Pavement Slabs Adjacent to the Backfill of Box Culverts*, Research Report, Highway Research Institute, Korea Highway Corporation.
- Jo, M. H., Kim, N. S., Jeong, J. H., and Seo, Y. G.(2006). Pavement Response in Flexible Pavements Using Nonlinear Tire Contact Pressure and Measured Tire Contact Area, *Journal of the*

- Korean Society of Civil Engineers, Vol. 26, No. 4D, pp. 601-608.
- Jung, Y. G.(2004). *Study on Soil Properties and Earth Pressure at Domestic Multi-layer*, Master Thesis, Hankyung University, Korea.
- KEC(2012). *Standard Drawings for Expressway Construction*, Korea Express Corporation.
- Kim, J. W.(2000). *Three-dimensional Finite Element Analysis of Multilayered Systems*, Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL.
- Korean Geotechnical Society(2009). *Interpretation of Structural Foundation Design Codes*, Goomi Book.
- MLTM(2008). *Standard Drawings of Culvert (Revision)*, Special Specifications, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea.
- MLTM(2011). *User Manual for Road Pavement Structure Design Program*, KPRP Final Report, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea.
- NAVFAC(1982). *Soil Mechanics Design Manual 7.1*, Naval Facilities Engineering Command, Department of the NAVY, Alexandria, VA, pp. 7.2-59~7.2-85.
- Park, J. Y., Hong, D. S., Lim, J. S., and Jeong, J. H.(2011). Development of Mechanistic-Empirical Joint Spacing Design Method for Concrete Pavement, *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 51-59.
- Park, J. Y., Sohn, D. S., Lee, J. H., and Jeong, J. H.(2012). A Study on Joint Position at Concrete Pavement with Box Culverts, *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 45-53.
- Pimentel, M., Costa, P., Carlos, F., and Figueiras, J.(2009). Behavior of Reinforced Concrete Box Culverts under High Embankments, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 135, Iss. 4, pp. 366-375.
- (접수일 : 2013. 8. 2 / 심사일 : 2013. 8. 2 / 심사완료일 : 2013. 9. 10)